

黄土高原晋中半干旱区不同肥力水平下连作春玉米 产量与土壤干燥化效应模拟

王学春¹, 李 军^{1,2}, 胡 伟¹, 蒋 斌³

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 在模拟精度验证基础上, 应用 WinEPIC 模型模拟研究了黄土高原晋中半干旱区 1960~2000 年期间不同肥力水平下连作春玉米的产量变化和土壤水分效应。模拟结果表明: (1) 无肥、低肥、中肥和高肥处理下连作春玉米的产量均呈现波动性降低趋势, 其平均值分别为 1.484、1.768、2.129 和 2.337 t/hm²; (2) 4 种肥力处理下连作玉米田逐月土壤有效含水量均呈现波动性降低趋势, 平均每年分别减少 5.6、8.4、8.4 和 11.4 mm, 不同肥力处理玉米田剧烈土壤干燥化过程和处理间差异的出现均主要发生在模拟研究的前 5 a 内, 无肥与低肥和中肥、高肥处理间土壤有效含水量差异十分显著; (3) 在模拟初期出现了 0~7 m 剖面土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的干燥化过程, 在模拟中后期均出现了稳定的土壤干层, 无肥处理土壤干层分布于 1~2 m, 低肥和中肥处理土壤干层分布于 1~3 m 土层, 高肥处理均分布于 1~4 m 土层, 表现出随肥力和作物产量水平的提高, 土壤干层厚度逐渐加深; (4) 晋中半干旱区玉米田土壤水分承载力介于低肥和中肥处理之间 (1.868~2.154 t/hm²), 相应的肥力水平为 N 45~90 kg/hm² 和 P 15~55 kg/hm²。

关键词: 黄土高原; 春玉米; WinEPIC 模型; 产量

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)01-0001-11

玉米是黄土高原晋中半干旱区主要粮食作物之一, 多年来随着抗旱品种和“以肥调水”技术的推广和应用, 使旱地玉米产量翻了一翻^[1]。但由于玉米耗水量和耗水深度增加, 导致了旱作高产玉米田深层土壤水分过耗和土壤干燥化现象发生, 2 m 以下深层土壤水库贮水量亏缺, 玉米生产对当季降水供给依赖增大, 产量年际波动性加剧^[2~3]。周怀平等利用长期定位试验研究了施肥对连作春玉米产量的增产效果, 但缺少对连作期间土壤水分利用和土壤干燥化进程的监测^[1]。目前的相关研究, 对不同肥力水平下高、中、低产玉米田的产量和深层土壤水分变化动态缺乏细致的定量研究。在李军等初步模拟研究渭北旱塬地春玉米连作条件下的水分生产潜力和根层土壤水分动态基础上^[4], 本研究致力于对不同肥力水平下连作春玉米产量波动性和土壤干燥化过程的定量研究, 分析不同肥力水平下春玉米连作中产量变化趋势和土壤干燥化规律, 寻求与当地降水状况相适应的、有利于土壤水分可持续利用的合理施肥水平和土壤水分承载力, 为黄土高原晋中半干旱区玉米生产的可持续发展提供科学依据。

1 研究方法

1.1 WinEPIC 模型简介

环境政策综合气候模型 EPIC (Environmental Policy Integrated Climate), 原名侵蚀和生产力影响计算模型 (Erosion - Productivity Impact Calculator), 是美国研制的定量评价“气候—土壤—作物—管理”综合系统的动力学模型, 由气象模拟、水文学、侵蚀泥沙、营养循环、农药残留、作物生长、土壤温度和土壤耕作等模块组成, 能够以天为时间步长, 定量模拟农田水土资源和作物生产力长周期动态变化过程, 可用来评价农田作物生产管理策略和水土资源环境效应^[5,6]。本研究采用能够在 Windows 环境下运行的 WinEPIC 3060 版, 可以输出逐日分层土壤水分模拟结果, 适用于作物生产系统综合性模拟分析和应用研究, 特别适合于旱地土壤水分生态环境效应的模拟和分析^[7]。

1.2 WinEPIC 模型数据库

运行 WinEPIC 模型前需要分别建立气象数据库、土壤参数数据库和作物参数数据库等数据库。

收稿日期: 2007-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30471024, 40371077)

作者简介: 王学春 (1979—), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事作物生产系统模拟与决策研究。E-mail: langzi0509@sina.com。

通讯作者: 李 军 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn。

以太原站 1960~2001 年逐日太阳辐射、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、风速等实时数据代表晋中寿阳试区气象状况,根据模型的格式要求导入气象数据库中^[8],建成太原逐日实时气象数据库。通过实地观测和查阅相关资料^[9,10],确定了 EPIC 模型中的晋中半干旱区典型农作土壤——褐土性土的土壤剖面理化性状参数。本研究将褐土性土分成了 10 个剖层,土层总厚度为 7.0 m,依次输入逐层土壤理化性状参数,建立土壤参数数据库;通过查阅相关文章^[11]和实测数据,分别对试区春玉米的潜在能量转换比率、生长最适温度、生长发育最低温度、最大叶面积系数等 39 个生理生态参数进行修订,建立作物参数数据库。

1.3 WinEPIC 模型模拟精度验证

本文以地处晋中半干旱区的寿阳试验站为试点,利用寿阳站长期连续定位试验数据验证 WinEPIC 模型对不同肥力水平下春玉米连作制中产量和作物生育期水分消耗量的模拟精度。肥力处理分别为:(1) 无肥处理,不施任何肥料(CK);(2) 氮磷处理 1,施纯氮 60 kg/hm²,纯磷 37.5 kg/hm²(N60);(3) 氮磷处理 2,施纯氮 120 kg/hm²、纯磷 75 kg/hm²(N120),肥料施用时间与当地大田管理

相同。利用太原站 1960~2001 年实时气象数据、褐土性土土壤数据和已经验证过的春玉米参数,对连作春玉米的不同施肥处理进行模拟研究。

将 3 个处理的玉米产量和生育期耗水量的模拟值和观测值进行比较以评价模型的精确性(表 1、图 1、图 2),其中观测值为寿阳试验站 1992~2001 年期间长期定位试验中的春玉米产量和生育期耗水量^[1]。表 3 显示,在 1992~2001 年试验研究期间,CK、N60、N120 处理春玉米产量模拟值的平均值分别为 2.494、4.302、4.549 t/hm²,相应的产量观测值的平均值分别为 2.829、4.645 和 5.026 t/hm²,产量模拟值和观测值的相关系数分别为 0.881、0.830 和 0.845,均达到极显著水平,平均相对误差分别为 -11.8%、-7.4%、-9.5%,模拟平方根误差 RMSE 分别为 0.567、0.952、0.890 t/hm²;CK、N60、N120 处理春玉米生育期耗水量模拟值的平均值分别为 383.0、379.1 和 383.5 mm,相应的耗水量观测值的平均值分别为 394.0、392.0 和 399.9 mm,耗水量模拟值和实测值的相关系数分别为 0.757、0.797 和 0.749,均达到极显著水平,平均相对误差分别为 -2.8%、-3.3%、-4.1%,模拟平方根误差 RMSE 分别为 54.8、39.0 和 54.8 mm。

表 1 寿阳试区不同施肥处理春玉米连作产量与耗水量模拟值与观测值比较

Table 1 Comparison of simulated and observed grain yield and water consumption amount of continuous spring maize under different fertilization treatments at Shouyang

项目 Items	无肥处理(CK) No fert. treatment			N60 处理 N60 treatment			N120 处理 N120 treatment		
	模拟值 Simulated (t/hm ²)	观测值 Observed (t/hm ²)	相对误差 Error (%)	模拟值 Simulated (t/hm ²)	观测值 Observed (t/hm ²)	相对误差 Error (%)	模拟值 Simulated (t/hm ²)	观测值 Observed (t/hm ²)	相对误差 Error (%)
平均值 Average	2.494	2.829	-11.8	4.302	4.645	-7.4	4.549	5.026	-9.5
籽粒 产量 Grain yield (t/hm ²)	RMSE	0.567	—	—	0.952	—	—	0.890	—
回归方程 Regression equation	—	y = 1.262 + 0.628x	—	—	y = 1.674 + 0.690x	—	—	y = 0.944 + 0.897x	—
相关系数 Correlation index	—	0.881**	—	—	0.830**	—	—	0.845**	—
平均值 Average	383.0	394.0	-2.8	379.1	392.0	-3.3	383.5	399.8	-4.1
耗水 量 Water consumption (mm)	RMSE	54.8	—	—	39.0	—	—	54.8	—
回归方程 Regression equation	—	y = 117.371 + 0.722x	—	—	y = 39.267 + 0.930x	—	—	y = 139.104 + 0.679x	—
相关系数 Correlation index	—	0.757**	—	—	0.797**	—	—	0.749**	—

图 1、图 2 分别为 3 种肥力水平处理春玉米产量和生育期耗水量的模拟值与观测值逐年变化曲线的比较,二者均有较为近似的变化趋势,表明 EPIC 模型可以较为精确地模拟不同施肥处理下连作春玉

米的产量和土壤水分变化动态,可用于黄土高原晋中半干旱区连作春玉米的产量效应和土壤水分效应模拟研究。

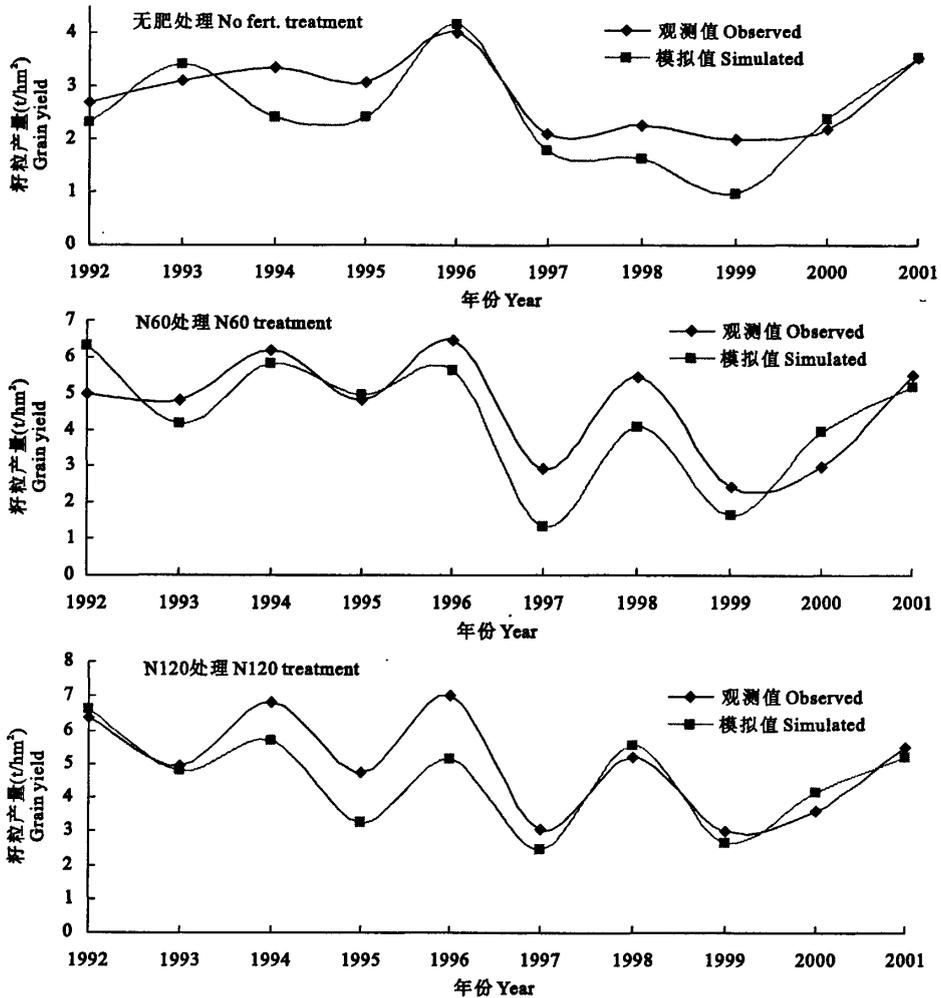


图 1 寿阳试区不同肥力水平下连作春玉米产量模拟值与观测值的比较
 Fig. 1 Comparison of simulated and observed yield of continuous spring maize under different fertilization treatments at Shouyang

1.4 模拟研究方法

为了比较不同肥力水平下春玉米产量和土壤水分利用特征,设定 4 种肥力水平处理:无肥(N 0 kg/hm², P 0 kg/hm²)、低肥(N 45 kg/hm², P 15 kg/hm²)、中肥(N 90 kg/hm², P 55 kg/hm²)和高肥(N 120 kg/hm², P 75 kg/hm²),肥料施用时间同大田。在 1960~2000 年期间,定量模拟和分析比较寿阳旱地春玉米连作条件下产量变化和土壤干燥化效应。在分析春玉米田逐月土壤有效含水量变化动态时,以每月 15 日土壤有效含水量模拟数据代表该月

土壤有效含水量;在分析玉米田土壤湿度剖面分布变化特征时,采用模型输出的每年 8 月 15 日土壤湿度剖面分布模拟数据代表该年玉米田的土壤湿度剖面分布特征。

2 模拟结果的分析

2.1 不同肥力水平下连作春玉米的产量变化

在 1960~2000 年模拟研究期间,无肥、低肥、中肥和高肥 4 种肥力水平下连作春玉米产量变化范围分别为 0.161~4.178、0.183~4.816、0.217~

5.829和 0.235 ~ 6.246 t/hm², 平均值分别为 1.484、1.768、2.129 和 2.337 t/hm², 标准差分别为 1.192、1.279、1.526 和 1.734 t/hm², 产量极差分别为 4.017、4.633、5.612 和 6.039 t/hm², 表现出随肥力水平提高产量波动幅度增大趋势。4 种肥力处理

产量变异系数分别为 80.3%、72.3%、71.7% 和 74.2%, 无肥处理的产量稳定性低于低肥、中肥和高肥处理。4 种肥力处理间产量差异显著, 低肥、中肥和高肥处理分别较无肥处理增产 19%、43% 和 57%。

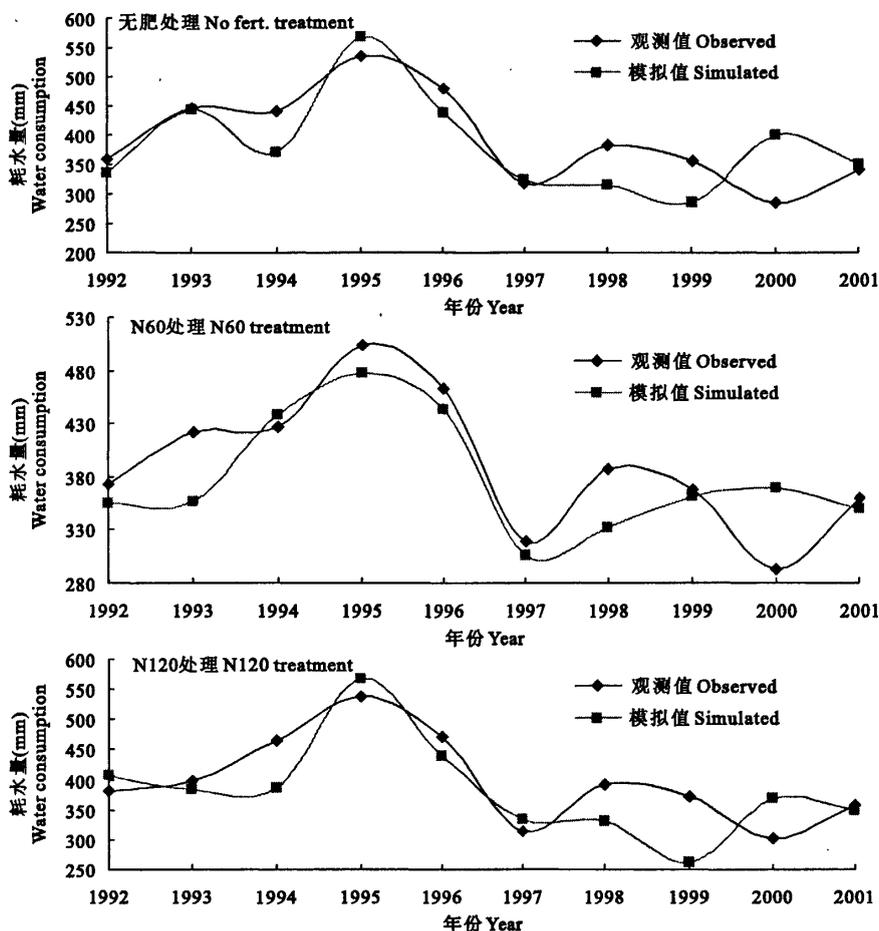


图 2 寿阳试区不同肥力处理下春玉米生育期耗水量模拟值与观测值的比较

Fig.2 Comparison of simulated and observed water consumption amounts of spring maize under different fertilization treatments at Shouyang

在 1960~2000 年模拟研究期间, 无肥、低肥、中肥和高肥处理连作春玉米产量均呈现波动性下降趋势(图 3 和表 2), 模拟研究后期(1990~2000 年)较模拟研究前期(1960~1969 年)分别减产 82.2%、64.1%、65.3% 和 67.5%。在 41 年连作玉米产量变化曲线中, 高峰多出现在模拟研究前期和降水较多的年份, 低谷则出现在模拟研究后期和降水较少的年份。在 41 年模拟时段内, 低肥、中肥和高肥处

理产量最低值均出现在 1976 年, 无肥处理则为 1997 年, 玉米产量均低于 0.3 t/hm², 次低产年份分别为 1994 年和 1999 年, 玉米产量分别低于 0.226 和 0.249 t/hm²; 4 种肥力水平处理的最高产量均出现在模拟研究时段的前 5 年, 低肥、中肥和高肥处理产量最高值均出现在 1960 年。无肥处理产量最高值出现在 1964 年, 次高产年份为 1962 年。

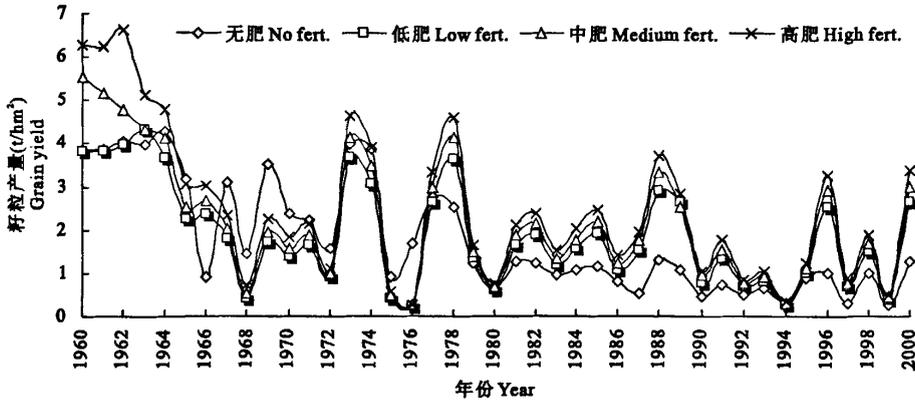


图 3 寿阳不同肥力水平下连作春玉米产量模拟值变化比较

Fig. 3 Comparison of continuous spring maize yield under different fertilization treatments at Shouyang

表 2 不同时段寿阳试区不同肥力水平下连作春玉米产量模拟值变化比较 (t/hm²)

Table 2 Comparison of simulated yield changes of spring maize under different fertilization treatments during different period at Shouyang

时段 Period	无肥 No fert.	低肥 Low fert.	中肥 Medium fert.	高肥 High fert.
1960~1969	3.190	2.755	3.381	3.866
1970~1979	1.488	1.895	2.233	2.388
1980~1989	0.779	1.509	1.822	1.948
1990~2000	0.568	0.990	1.172	1.254

2.2 不同肥力水平下春玉米的干旱胁迫与氮素胁迫

在 1960~2000 年模拟研究期间,年降水量平均值为 445.5 mm,其中前 10 年(1960~1969 年)平均值为 503.2 mm,后 11 年(1991~1998 年)平均值为 417.5 mm,后期较前期年降水量减少 85.7 mm。在 41 年期间,无肥、低肥、中肥和高肥处理年均干旱胁迫日数分别为 41.2、43.5、54.0 和 54.2 d,标准差为 22.6、20.2、20.7 和 20.7 d。不同处理干旱胁迫日数变化趋势类似,且与年降水量变化趋势相反,并随肥力水平提高,玉米生长期间的干旱胁迫日数增加。在 41 年中,1968、1972、1997 年均均为严重干旱年型,干旱胁迫天数超过 80 d(图 4),其中 1972 年干旱胁迫天数最高,4 种肥力处理分别为 80.7、80.9、100.2 和 100.2 d。

在 1960~2000 年的 41 年模拟研究期间,无肥、低肥、中肥和高肥处理年均氮素胁迫天数分别为 14.38、7.47、0.16 和 0.08 d,表现为随施肥量增加,氮素胁迫程度降低趋势,无肥、低肥明显较高,而中

肥和高肥处理几乎不存在氮素胁迫。前 13 年所有处理的春玉米均未受到氮素胁迫,无肥和低肥处理分别从 1974 和 1975 年开始出现氮素胁迫并呈现波动性上升趋势,其氮素胁迫日数平均值为 20.4 d 和 11.7 d,其中在严重干旱年型 1976、1980、1994、1997 年作物产量很低,氮素胁迫日数为零,氮素胁迫日数最高值出现在 2000 年,分别为 46 d 和 45 d(图 5)。

2.3 不同肥力水平下连作春玉米田逐月土壤有效含水量变化

在 1960~2000 年的 41 年模拟研究期间,无肥、低肥、中肥和高肥处理 0~7 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值分别在 602~868、476~868、476~868 和 350~868 mm 范围内波动,492 个月平均值分别为 660.3、535.3、528.3 和 411.0 mm,标准差分别为 44.3、66.2、49.0 和 49.7 mm,变异系数分别为 6.7%、12.4%、9.3% 和 17.2%。无肥与低肥、中肥、高肥处理间差异十分显著,但从 1963 年起低肥和中肥处理间差异很小,曲线基本重叠。肥力水平越高,土壤含水量越低,低肥、中肥和高肥处理较无肥处理逐月土壤有效含水量平均值分别降低 125.0、132.0 和 249.3 mm。

随着年度和季节降水量变化,各肥力处理逐月土壤有效含水量均呈现波动性降低趋势(图 6)。寿阳旱地玉米田土壤干燥化过程主要发生在模拟研究初期的前 5 年(1960~1964 年)内。无肥、低肥、中肥和高肥处理在模拟初期土壤有效含水量均为 868 mm,但在 1964 年 12 月分别降低到 770、588、602 和 483 mm,5 a 间分别降低 98、280、266 和 385 mm,年均降低量 19.6、56.0、53.2 和 77.0 mm,随肥力水平提高,土壤干燥化速度越快。到 2000 年春玉米收获

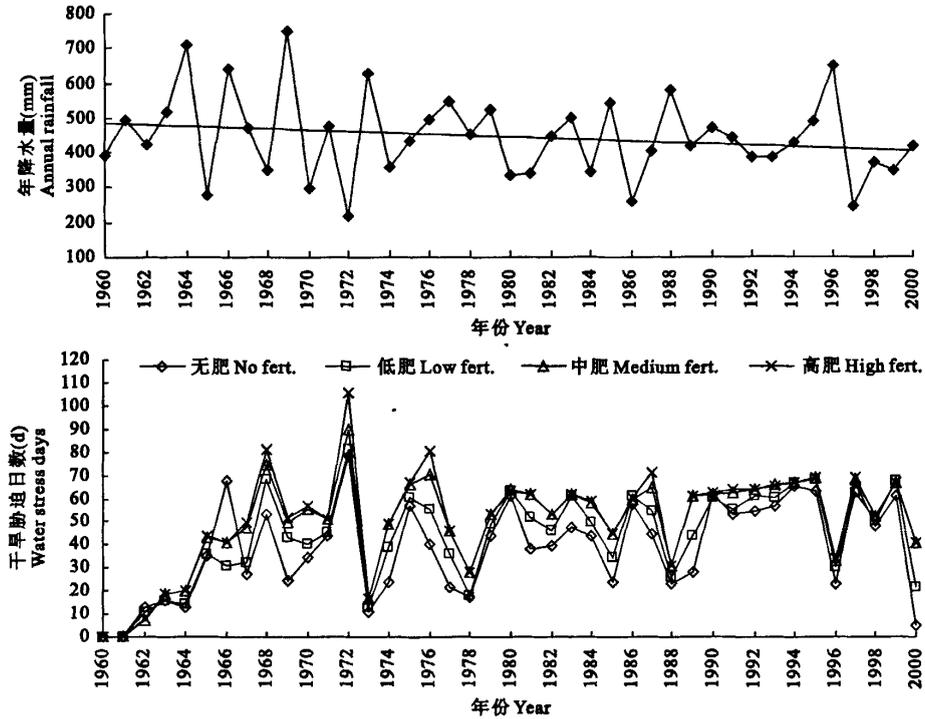


图 4 寿阳年降水量、不同肥力水平下连作春玉米干旱胁迫天数比较

Fig. 4 Annual rainfall, simulated soil water stress days of continuous spring maize under different fertilization treatments at Shouyang

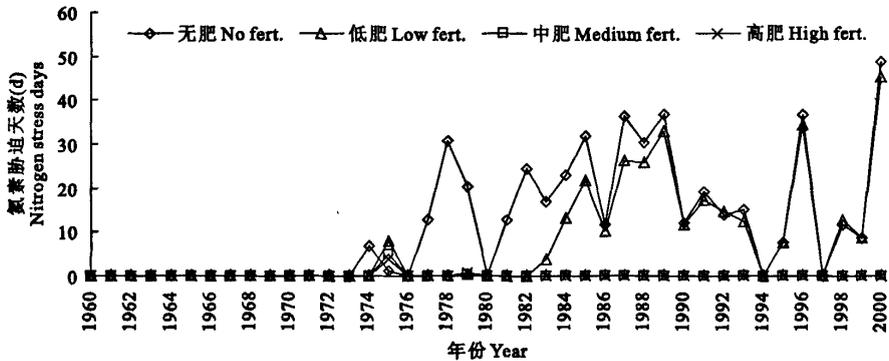


图 5 寿阳连作春玉米田不同肥力水平下春玉米氮素胁迫天数比较

Fig. 5 Comparison of nitrogen stress days of continuous spring maize under different fertilization treatments at Shouyang

时则分别为 644、518、518 和 392 mm, 41 a 期间土壤有效含水量分别减少 231、343、343 和 469 mm, 平均每年减少 5.6、8.4、8.4 和 11.4 mm, 低、中、高肥处理土壤干燥化速度快于无肥处理。与无肥处理相比, 41 a 间低肥、中肥和高肥处理多消耗土壤水分 112、112 和 238 mm。在经过模拟研究初期 5 a 强烈土壤干燥化过程后的 36 年期间, 各肥力处理玉米田

土壤有效含水量降低趋势并不明显, 和 1965 年 1 月份的 763、575、588 和 469 mm 相比, 至 2000 年 12 月份时分别降低 112、28、42 和 49 mm, 36 a 平均土壤干燥化速度分别为 3.1、0.8、1.2 和 1.4 mm。虽然土壤有效含水量随年度和季节降水量变化和玉米生长消耗而发生波动, 但干燥化速度很低。在干旱年份和春玉米生长旺盛期呈现逐渐下降趋势, 而在

多雨年份和冬闲期得到降水补充和恢复提高,通常以每年 5~8 月份玉米生长期土壤含水量较低,而 9 月~翌年 4 月土壤含水量较高,在一些干旱年份的

5~8 月份,高肥处理 0~7 m 土层土壤有效含水量接近于 350 mm 较低水平,发生了季节性土壤干燥化。

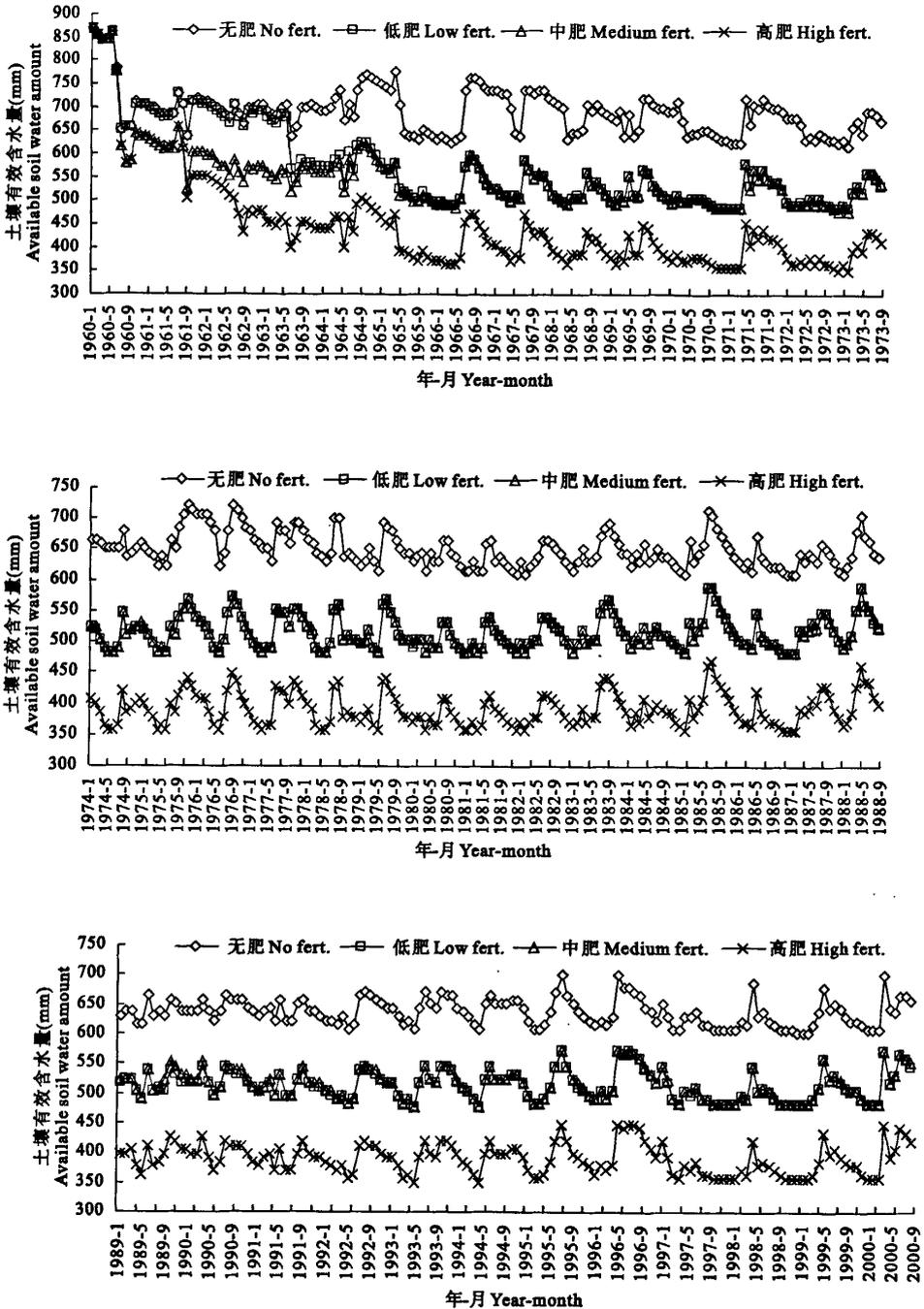


图 6 寿阳连作春玉米田不同肥力水平下 0~7 m 土层逐月土壤有效含水量模拟值变化动态

Fig. 6 Simulated monthly available soil water amount changes of continuous spring maize in 0~7 m soil layers under different fertilization treatments at Shouyang

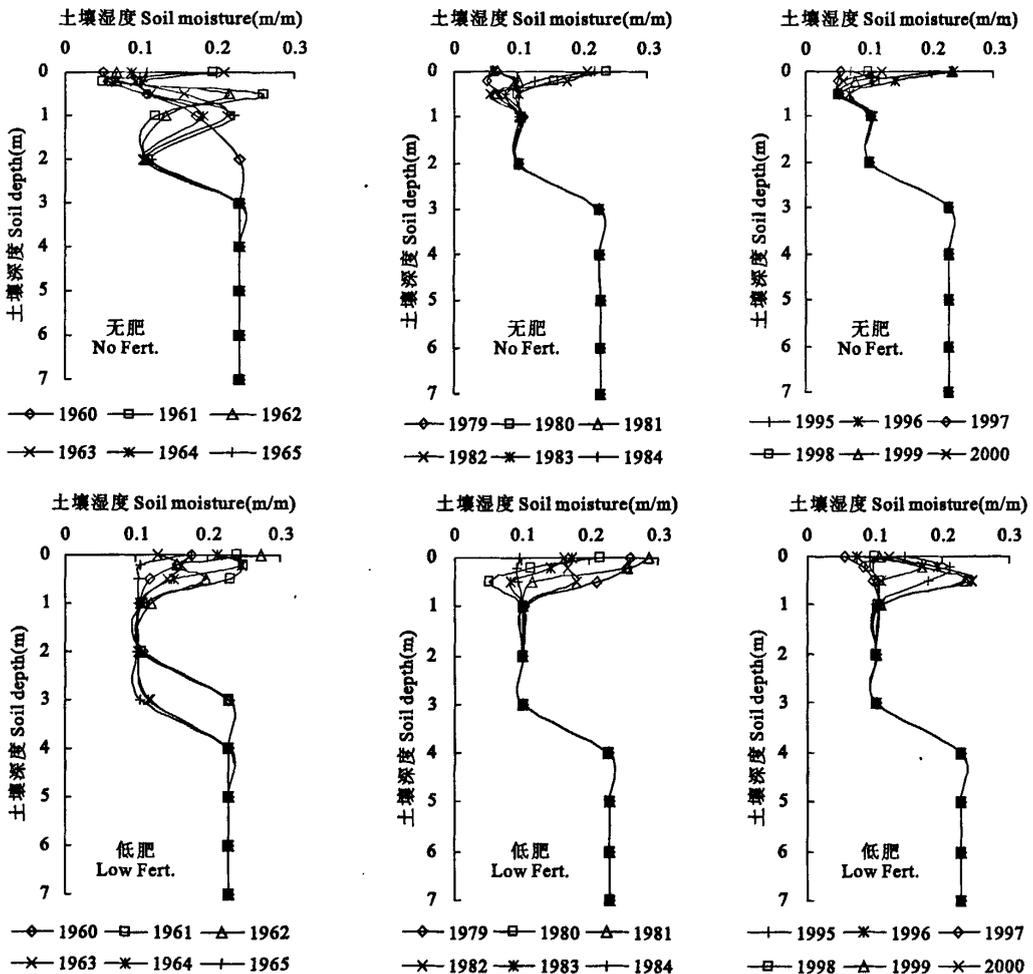
2.4 不同肥力水平下连作春玉米田土壤湿度剖面分布变化

在 1960~2000 年的 41 a 模拟研究期间,将模拟初期(1960~1965 年)、中期(1979~1984 年)和末期(1995~2000 年)逐年 8 月 15 日土壤湿度剖面分布变化比较列于图 7。与模拟初期的 1960 年相比,无肥、低肥、中肥和高肥处理均在 1960~1965 年期间出现了土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的过程,土壤干层最大分布深度分别达到 2、3、3 和 4 m,分别在 1973 年剖面 1~2 m 土层、1970 年剖面 2~3 m 土层、1969 年剖面 2~3 m 土层和 1970 年剖面 2~4 m 土层土壤湿度达到稳定状态,此后,无肥处理只有 0~1 m 土层,低肥、中肥和高肥处理均只有 0~2 m 土层土壤湿度发生年际变化,其下深层土壤湿度接近稳定状态,不随降水发生年度变化。玉米对土壤水分利用最大深度,无肥处理超过了 2

m,但在 3 m 以内,低肥和中肥处理超过了 3 m,高肥处理超过了 4 m。无肥处理土壤干层分布于 1~2 m,低肥和中肥处理均分布于 1~3 m 土层,而高肥处理分布于 1~4 m 土层。结果表明,在黄土高原晋中半干旱区,随着肥力水平和作物产量水平的提高,土壤干燥化程度加剧,土壤干层厚度加深。

2.5 不同肥力水平下连作春玉米田生产年度耗水量比较

在 1960~2000 年模拟研究期间,寿阳无肥、低肥、中肥和高肥处理玉米田生产年度耗水量模拟值分别介于 275.8~742.1、265.1~756.1、265.1~749.1 和 272.1~749.1 mm 范围内,平均值分别为 450.6、453.4、453.2 和 456.5 mm,标准差分别为 102.5、117.7、111.6 和 112.2 mm。低肥、中肥和高肥处理玉米田 41 个生产年度耗水量平均值分别较无肥处理玉米田高出 2.8、2.6 和 5.9 mm,在 41 年



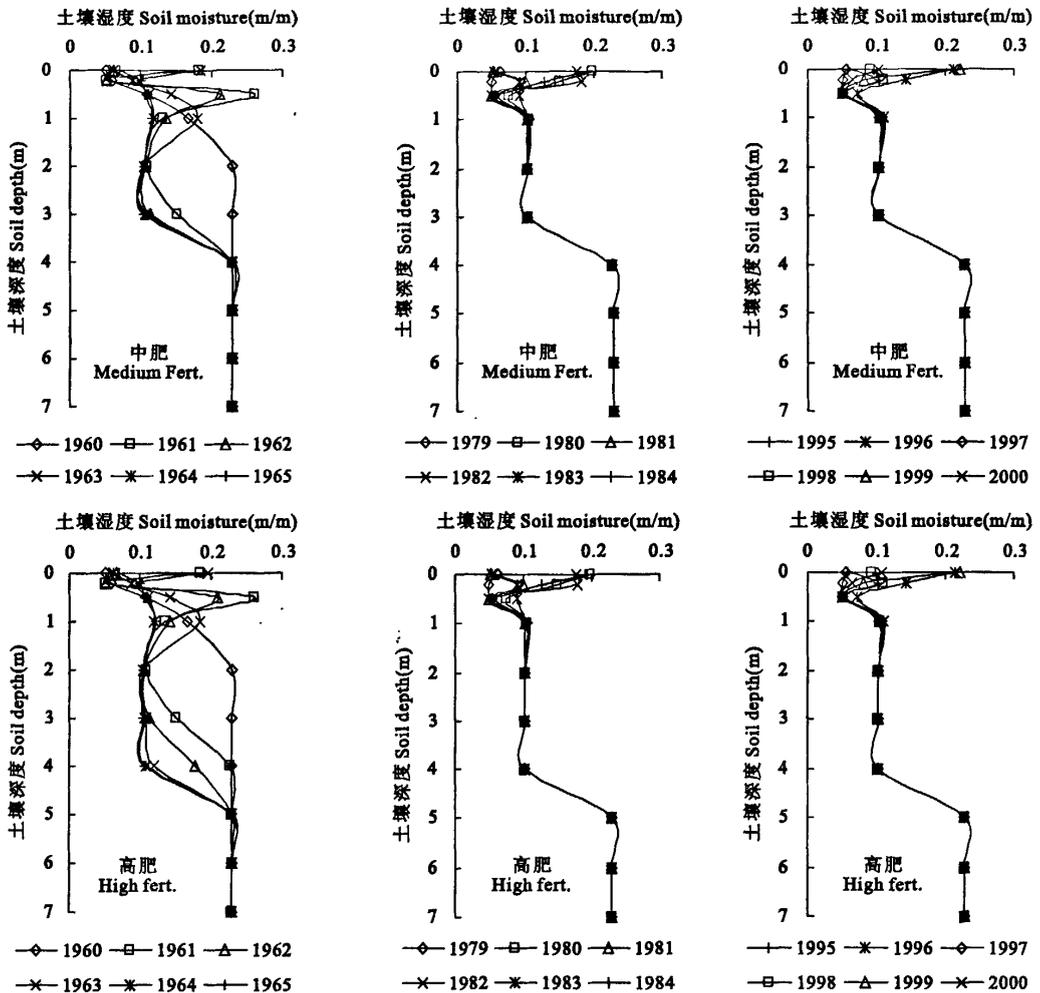


图 7 寿阳连作春玉米初期、中期和末期不同肥力水平处理土壤湿度剖面分布变化比较

Fig. 7 Comparison of soil moisture distribution changes in 0~7 m soil profile at beginning, middle and end rotations of continuous spring maize under different fertilization treatments at Shouyang

中分别共计多耗水 114.8、106.6 和 241.9 mm。其中,在 1960~1964 年期间,低肥、中肥和高肥处理较无肥处理玉米田多耗水 189、175 和 294 mm(表 3)。在 1965 年之后的 36 年中,不同肥力处理之间玉米田生产年度耗水量较为接近,差异并不明显,某些年份无肥处理生产年度耗水量反而稍高于施肥处理。可见,旱地高产玉米田土壤干燥化过程主要发生在前 5 年之内。模拟结果还显示,在 41 年春玉米连作期间,4 种肥力处理玉米田生产年度耗水量均随降水量年度变化而呈现波动性降低趋势(图 8 和表 3)。由于年度降水量的趋势性降低,同时受土壤干

燥化影响,深层土壤贮水量减少,导致玉米田生产年度耗水量波动性降低,是旱地玉米产量波动性降低的主要原因之一。

在 41 a 连作期间,寿阳旱地无肥、低肥、中肥和高肥处理春玉米田水分利用效率平均值分别为 0.32、0.39、0.46 和 0.51 kg/m³,表现出随着施肥量增加,旱地春玉米田水分利用效率逐渐提高。低肥和中肥处理玉米田 0~7 m 土层土壤含水量低于无肥处理,而玉米产量和水分利用效率明显提高,从增产和土壤水分可持续利用角度统筹考虑,以低肥至中肥处理最佳。从模拟结果来推断,寿阳旱地春玉

米田土壤水分承载力介于低肥和中肥处理之间,即 41 a 产量平均值 1.76~2.14 t/hm²,相应的肥力水平为 N 45~90 kg/hm² 和 P 15~55 kg/hm²。

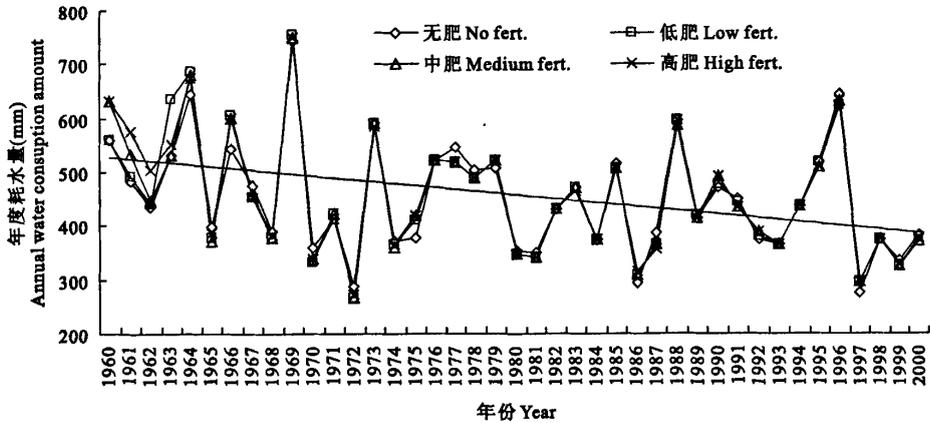


图 8 寿阳不同肥力水平下连作春玉米生产年度耗水量模拟值变化动态

Fig. 8 Simulated annual water consumption amount changes of continuous spring maize field under different fertilization treatments at Shouyang

表 3 寿阳施肥处理连作玉米田较无肥处理水分过耗量比较(mm)

Table 3 Comparison of annual water consumption amount of winter wheat field under different fertilization treatments during different period at Shouyang

时段 Period	低肥 Low fert.	中肥 Medium fert.	高肥 High fert.	平均值 Average
1960	0	77	77	51.33
1961	0	42	105	49.00
1962	0	7	56	21.00
1963	47	14	21	27.33
1964	142	35	35	70.67
合计 Sum	189	175	294	219.33

3 结论与讨论

1) 利用 WinEPIC 模型模拟研究了黄土高原晋中半干旱区不同肥力处理下连作春玉米的产量效应,CK、N、NP 处理产量模拟值与观测值之间的平均误差分别为 -11.8%、-7.4%、-9.5%,生育期耗水量模拟值与观测值之间的平均误差分别为 -2.8%、-3.3%、-4.1%,表明 WinEPIC 模型对不同肥力处理下春玉米籽粒产量和耗水量的模拟较为准确,较为适用于黄土高原半干旱区春玉米连作系统的模拟研究。但模型中也存在稍显不足之处,模型对土壤剖面分层数目最大为 10 层,对 0~7 m 的剖面深层土壤湿度状况描述还不够细致。

2) 在 1960~2000 年模拟研究期间,在无肥、低肥、中肥和高肥等 4 种肥力水平下,春玉米连作方式

的产量均呈现显著的波动性下降趋势,其平均值分别为 1.483、1.768、2.129 和 2.337 t/hm²。随肥力水平提高,玉米田干旱胁迫日数增加,而氮素胁迫日数降低,中肥和高肥处理无氮素胁迫。

3) 无肥、低肥、中肥和高肥等 4 种肥力处理下春玉米连作逐月土壤有效含水量均呈现波动性降低趋势,平均每年分别减少 5.6、8.4、8.4 和 11.4 mm。不同肥力处理玉米田剧烈土壤干燥化发生过程和处理间差异的出现均主要发生在模拟研究的前 5 年内。无肥与低肥、中肥和高肥处理间土壤有效含水量差异十分显著,但低肥和中肥处理间差异不明显。肥力越高,作物耗水量越大,土壤有效含水量越低。

4) 4 种肥力水平处理下春玉米连作期间 0~7 m 土层土壤湿度剖面分布,均在模拟初期出现了土壤湿度逐年降低、土壤干层逐年加厚的干燥化过程,在模拟中后期均出现了稳定的土壤干层,无肥处理土壤干层分布于 1~2 m,低肥和中肥处理土壤干层分布于 1~3 m 土层,高肥处理均分布于 1~4 m 土层。随着肥力和玉米产量水平的提高,土壤干层厚度加深。

5) 4 种肥力水平处理玉米田生产年度耗水量平均值分别为 450.6、453.4、453.2 和 456.5 mm,处理间差异不大并均表现为波动性显著降低趋势。在模拟研究初期,低肥、中肥和高肥处理玉米田耗水量明显高于无肥处理,前 1~5 a 期间共计较无肥处理玉米田多耗水 189、175 和 294 mm。随肥力水平上升,玉米田水分利用效率逐渐提高。晋中半干旱区玉米田土壤水分承载力介于低肥和中肥处理之间

, (1.768~2.128 t/hm²), 相应的肥力水平为 N 45~90 kg/hm²和 P 15~55 kg/hm²。

参考文献:

- [1] 周怀平, 杨治平, 李红梅, 等. 施肥和降水年型对旱地玉米产量及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 27—31.
- [2] 李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 353—356.
- [3] 黄明斌, 党廷辉, 李玉山. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 50—54.
- [4] 李军, 邵明安, 张兴昌, 等. 黄土高原旱塬区高产玉米田土壤干燥化与产量波动趋势模拟研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 54—58.
- [5] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(16): 738—745.
- [6] Williams, JR, CA Jones, JR Kiniry, et al. The EPIC crop growth model[J]. Trans ASAE, 1989, 32(2): 475—511.
- [7] Texas A & M Blackland Research Center. Researcher's Guide to WinEPIC, Version 1.0. BRC report No. 0406[M]. Texas: Texas A & M Blackland Research Center, 2004.
- [8] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区 EPIC 模型数据库组建[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(8): 21—26.
- [9] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(第五卷)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995. 244—254.
- [10] 山西省土壤普查办公室. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [11] 李军, 邵明安, 张兴昌. EPIC 模型中土壤氮磷运转和作物营养的数学模拟[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 166—173.

Simulation of yield and soil desiccation effects of continuous spring maize under different level fertilization treatments in Jinzhong semiarid areas of the Loess Plateau

WANG Xue-chun¹, LI Jun^{1,2}, HU Wei¹, JIANG Bin³

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100;

3. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on model validation, the WinEPIC model was used to simulate yield and soil desiccation effects of continuous spring maize under different level fertilization treatments in Jinzhong semiarid areas of the Loess Plateau. The simulated results show as following: (1) Crop yield of continuous spring maize under no fertilization, low fertilization, medium fertilization and high fertilization treatment decreased significantly with fluctuation, and the average yield was 1.484 t/hm², 1.768 t/hm², 2.129 t/hm² and 2.337 t/hm² respectively; (2) Simulated monthly available soil water content of all 4 fertilization treatments declined with annual and seasonal fluctuations, and the average annual decreasing rate was 5.6 mm, 8.4 mm, 8.4 mm and 11.4 mm separately, and strong soil desiccation and differences of available soil water content among fertilization treatments occurred during the 5 beginning years of the simulation, and differences of soil water content among no fertilization, low fertilization and medium fertilization, as well as high fertilization treatments were very significant; (3) Soil moisture decreased and desiccated soil layers thickened gradually at the beginning of simulation, and stable desiccated soil layers occurred during middle and end of simulation. Distribution depth of desiccated soil layers was 1~2 m of no fertilization treatment, 1~3 m of both low and medium fertilization treatments, and 1~4 m of high fertilization treatments, and indicated that desiccated soil layers thickened with the increasing of fertilization and crop yield; (4) Soil water carrying capacity of dryland spring maize field at Jinzhong is 1.868~2.154 t/hm², and its fertilization application amount is N 45~60 kg/hm² and P 15~55 kg/hm².

Key words: loess plateau; spring maize; WinEPIC model; crop yield; fertilization treatment